

М. В. БУТКО, вед. инженер, НТУ «ХПИ»;

С.М. БУТКО, инженер, НТУ «ХПИ»;

О.Ю. ДУБИЙЧУК, канд. техн. наук., зав. сект., НТУ «ХПИ»;

В.В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр, НТУ «ХПИ»;

С.Н. СВИРИДОК, студент, НТУ «ХПИ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ СЛОИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ПЛЕНКИ ТОЛЩИНОЙ 40 МКМ

Наведені результати ресурсних випробувань секцій високовольних конденсаторів з поперополіпропіленової ізоляції, що просочена трансформаторним маслом в імпульсному режимі.

Results resource tests section of high-voltage capacitors with paper-insulated polypropylene, impregnated with transformer oil in a pulsed mode are presented.

Приведены результаты ресурсных испытаний секций высоковольтных конденсаторов с бумажно-полипропиленовой изоляцией, пропитанных трансформаторным маслом в импульсном режиме.

Постановка задачи. Высокие удельные характеристики импульсных высоковольтных конденсаторов, достигнутые в 70-х годах прошлого столетия за счет применения в конденсаторах бумажного диэлектрика, пропитанного касторовым маслом, в настоящее время постепенно уступают характеристикам конденсаторов с комбинированным диэлектриком и чисто пленочным [1]. Это стало возможным за счет существенного уменьшения толщины изоляции и совершенствования технологии, обеспечивающей качественную пропитку пленочной изоляции диэлектрической жидкостью без применения бумажных лент между соседними слоями пленки.

Прогресс в области создания пленочных импульсных высоковольтных конденсаторов привел к сокращению доли выпуска конденсаторов с бумажно-касторовой пропиткой. В тоже время приводимые в соответственных литературных источниках данные по пленочным импульсным конденсаторам, в частности ресурсных характеристик декларируют для режимов близких к апериодическим, когда ресурс максимален. Однако опыт эксплуатации этих конденсаторов, в настоящее время все чаще вызывает нарекания у потребителей, особенно в режимах колебательного разряда, когда наблюдается выход из строя конденсаторов при ресурсах на 1-2 порядка меньших задекларированных значений, хотя по данным [2] влияние декремента колебаний не является существенным. Большое значение также имеют конструктивные факторы, влияющие на ресурс. К ним относятся толщина изоляции между обкладками [3], число слоев диэлектрика при одной и той же толщине изоляции ме-

жду обкладками, толщина обкладки, применение комбинированной изоляции (из слоев различных диэлектриков). Ресурс увеличивается с уменьшением толщины изоляции d ($M \sim d^{(-2 \div -3)}$), увеличением числа слоев N диэлектрика, или соответственно уменьшением толщины каждого слоя ($M \sim N$), увеличением объемной доли слоев пленки в бумажно-пленочной изоляции [4]. Увеличение объемной доли пленки, обладающей большей электрической прочностью, чем пропитанный бумажный диэлектрик но меньшим значением диэлектрической проницаемости приводит к положительному суммарному эффекту увеличения ресурса. Увеличивать толщину обкладки нецелесообразно из-за слабого эффекта увеличения ресурса и возможности полезно использовать занимаемый обкладкой объем при меньших толщинах обкладки и снижении рабочей напряженности электрического поля.

Если для чисто пленочных конденсаторов необходимо выполнить ряд жестких требований по: запрессовке в пакет при оптимальных значениях механического давления; намотке секций в предельно чистом помещении; применению специальной технологии сушки, индивидуальной пропитке конденсаторов, то для бумажно-пленочных конденсаторов требования к технологии изготовления является менее жесткими, а лучшие характеристики достигаются при увеличении процентного содержания пленки. На практике удается создать бумажно-пленочные конденсаторы с содержанием пленки до 50 % объема диэлектрика [4]. Большее значение процента содержания пленки возможно лишь при существенном увеличении толщины слоя пленки по отношению к толщине листа бумаги, которые в конструкции укладываются поочередно для улучшения пропитки. Это приводит к увеличению общей толщины диэлектрика и как следствие к уменьшению ресурса. Представляет интерес определение ресурса для пленочных и бумажно-пленочных конденсаторов с высоким процентным содержанием пленки, в условиях снижения требований к технологии сушки и пропитки (существенного сокращения и упрощения цикла изготовления), когда ресурс обеспечивает только длительная электрическая прочность пленки. Такой путь создания конденсаторов возможен при необходимости быстрого их изготовления и в больших количествах в ущерб технологии при соответствующем уровне цена – качество, когда быстрое достижение ожидаемого результата является определяющим. Таким образом, представляет интерес и исследование длительной электрической прочности образцов конденсаторной изоляции с повышенным содержанием пленки (более 50%), что возможно при применении толстых слоев пленки, изготовленных по упрощенной технологии. Предварительные результаты по кратковременной электрической прочности на переменном напряжении для данного типа конструкции, пропитанной по традиционной технологии касторовым маслом изложены в работе [5].

Цель работы. Проведение поисковых исследований и определение ресурса секций импульсных высоковольтных конденсаторов с содержанием пленки более 50 % объема, предназначенных для использования в составе генера-

торов передвижных электролабораторий для определения мест повреждения кабелей в режимах колебательного разряда.

Конструкция образцов. Для проведения эксперимента использованы конденсаторная бумага КОН-2-10, полипропиленовая пленка толщиной 40 мкм, алюминиевая фольга толщиной 9 мкм и широко распространенное трансформаторное масло Т-1500. Применение полипропиленовой пленки обусловлено возможностью использования секций в частотных режимах; а также тем, что она производится в Украине. Секции для испытаний выполнены цилиндрическими с выступающими обкладками на противоположных концах цилиндрической секции (рис. 1). Структура секций и последовательность укладки листов диэлектрика между обкладками представлены в таблице. Секции намотаны на полипропиленовую трубку с наружным диаметром 33 мм (рис. 1, а). Выводы выполнены из многожильного провода и выведены с одного из торцов секции. Один вывод расположен внутри трубки и соединен с выступающей частью одной обкладки с помощью винтового соединения. Второй вывод расположен снаружи трубки и соединен с выступающей частью другой обкладки. Секция помещена в пластиковый бутыль, а выводы выведены из бутыля через горлышко (рис. 1, б).

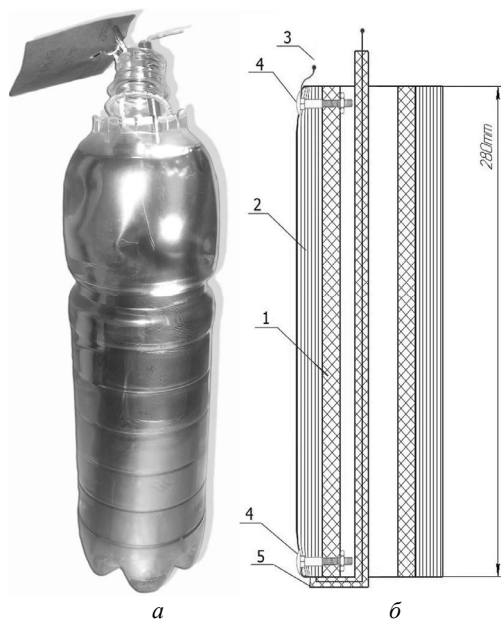


Рисунок 1 – Образец конденсатора (а) и его структура (б):

1 – изоляционная оправа ($\varnothing=25$); 2 – намотанная секция;
3, 5 – выводы; 4 – винтовой зажим выводов с обкладками

Структура изоляции представлена, представленная в табл. 1, означает Б – бумага толщиной 10 мкм, П – пленка толщиной 40 мкм, а укладка листов осуществляется в поочередной последовательности. После намотки образцы № 1, № 2, № 4, № 7 залиты трансформаторным маслом в вакууме без предварительной термовакуумной обработки. Образцы № 3, № 5, № 6 прошли полный цикл термовакуумной обработки и также залиты трансформаторным маслом в вакууме. Электрическая прочность масла в стационарном разряднике составила 70 кВ. Обкладки выполнены выступающими с противоположных сторон образцов.

Таблица 1 – Структура и параметры испытываемых образцов

№	Структура образца	C, нФ	Tg δ
1	ПП	79,39	0,0002
2	ППП	51,2	0,0002
3	БПБ сушеный	129,8	0,0012
4	БББББ	283,1	0,0787
5	БПБПБ сушеный	70,37	0,0009
6	БББББ сушеный	239,6	0,0049
7	БПБПБ	72,6	0,011

Методика проведения испытаний. Перед испытаниями измерены емкость C и тангенс угла диэлектрических потерь образцов tg δ (табл. 1). Выборочно определены зависимости измерения тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 2) и емкости от напряжения U (50 Гц) с помощью устройства ИПИ-10-МИ. Емкость при изменении напряжения не изменялась.

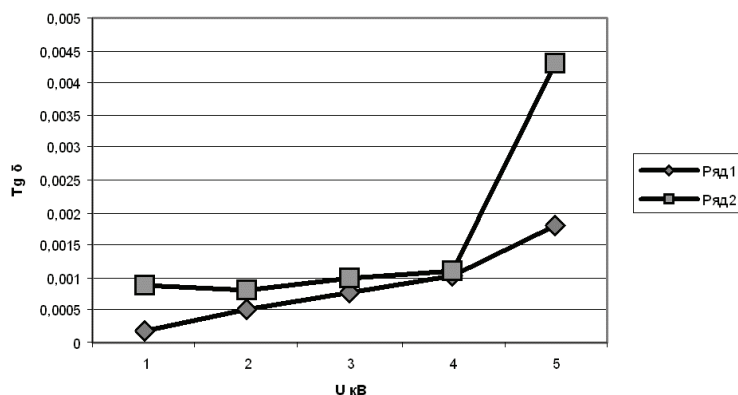


Рисунок 2 – Зависимость tg δ от U: 1 – образец №1; 2 – образец №5

Значения $\operatorname{tg} \delta$ при низких напряжениях (до 1 кВ) у чисто пленочных образцов в 4-5 раз меньше, чем у комбинированных и практически сравниваются при рабочих напряжениях (3÷4) кВ. При этом значения $\operatorname{tg} \delta$ меньше допустимого 0.01, что является приемлемым. Резкий рост $\operatorname{tg} \delta$ для образца №5 свидетельствует о появлении ионизационных процессов в изоляции и связан с наличием бумаги в изоляции.

Для проведения испытаний в импульсном режиме собрана реальная электрическая схем, применяемая в передвижных электролабораториях для определения мест повреждения силовых кабелей (рис. 3).

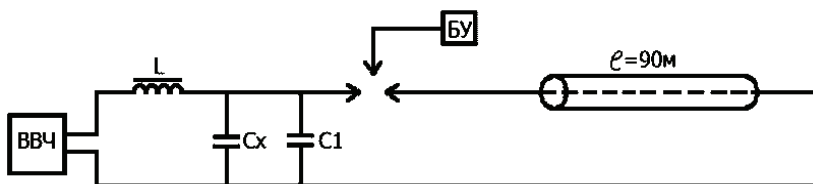


Рисунок 3 – Электрическая схема испытаний установки: ВВЧ – высоковольтный блок заряда; L – дроссель; P – разрядник; Cx – испытываемый образец; C1 – нагрузочная емкость; L = 90 м – высоковольтный кабель ПВБЕВ-60-3.5 длиной 90 м; БУ – блок управления.

При испытаниях контролировалось зарядное напряжение на емкости Cx с помощью делителя напряжения и разрядный ток с помощью трансформатора тока и осциллографа. Нагрузочная емкость ($C1 = 0,25$ мкФ) обеспечивала узкий диапазон изменения частот разрядного тока при изменении емкости Cx испытываемых образцов от 50 до 300 нФ. Типичная осциллограмма тока при работе только емкости C1 представлена на рис. 4. По осциллограмме определены декремент колебаний Δ и период колебаний $T = 20$ мкс.

$$\Delta = I1/I2 = 1,7. \quad (1)$$

Поскольку декремент колебаний меньше 2, то этот режим можно отнести к режиму слабозатухающих колебаний импульсов. Тем более, что увеличение разрядной емкости при параллельном дополнительном присоединении образца Cx будет приводить только к уменьшению декремента колебаний. Частота следования импульсов составила 0,83 Гц и контролировалась блоком управления разрядником. Ступенчатые колебания на фронте импульса вызваны волновыми процессами отражения и преломления электромагнитной волны в длинном кабеле в начальный момент его включения под напряжение. Некоторые результаты ресурсных испытаний представлены в табл. 2, где приведены значения испытательной напряженности электрического поля E (кВ/мм), экспериментальные значения ресурса M (число импульсов), расчетное значение напряженности электрического поля, определенное по формуле [6].

$$Ep = E\sqrt{M/Mp}, \quad (2)$$

где Mp – необходимое значение ресурса, $Mp = 10^5$, и $Womn$ – относительная удельная энергия, определяемая по соотношению для расчетного значения ресурса 10^5 импульсов

$$Womn = \frac{\varepsilon_6 \cdot E_{(6)}^2}{\varepsilon_i \cdot E_{(i)}^2}, \quad (3)$$

где индексы «6» и «i» относятся соответственно к 6 и i -му образцам табл. 2, ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

Образец № 4 пробился при подъеме напряжения, а кратковременная электрическая прочность образца № 6 после наработки $2 \cdot 10^4$ импульсов составила 200 кВ/мм. Значения относительной диэлектрической проницаемости ε для образцов № 3 и № 4 получены расчетным путем.

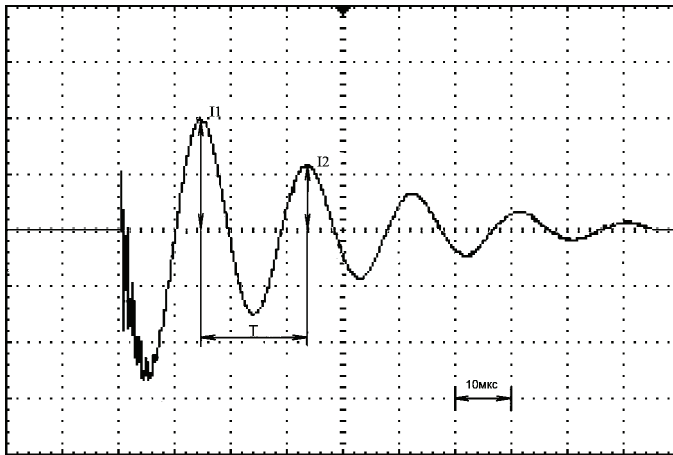


Рисунок 4 – Осциллограмма импульса тока при $Cx = 0$, $U = 20$ кВ

Анализ таблицы показывает, что лучшими вариантами выполнения конденсаторов при одном и том же ресурсе в режимах слабоколебательного разряда ($\Delta \leq 2$) является пропитанный бумажный образец с общей толщиной диэлектрика 50 мкм и бумажно-пленочный с общей толщиной диэлектрика 110 мкм, которые имеют наибольшее значение удельной энергии. Следует заметить, что испытания образца № 6 были закончены некорректно, доведя его до пробоя разовым повышением напряжения. Поэтому ресурс образца № 6 может быть больше, что требует дальнейшей проверки и анализа.

Худшие результаты получены для чисто полипропиленовой изоляции, залитой маслом. Подобные результаты для этой изоляции получены ранее в

работе [7] для 2-х и 3-х слойных полипропиленовых образцов с толщиной пленки 12 мкм, и пропитанных по традиционной технологии.

Таблица 2 – Результаты испытаний

№	Тип секции	Е, кВ/мм	М	Е _р , кВ/мм М = 10 ⁵	W _{отн}	ε
1	ПП	125	10 ³	58	0,32	2,2
2	ППП	100	2 · 10 ³	52	0,26	2,2
3	БПБПБ	123	2,4 · 10 ⁴	90	0,88	2,5
4	БПБ	125	1,7 · 10 ³	63	0,444	2,59
5	БББББ	40	1			4,0
6	БББББ	100 200	2 · 10 ⁴ 1	76	1	4,0

Выводы.

1. Результаты пробных испытаний на ресурс показывают, что возможно создание бумажно-пропиленовых конденсаторов с большим содержанием (более 70 %) пленки, изготовленных по упрощенной технологии и имеющих такую же удельную энергию, как бумажно-масляные конденсаторы традиционного исполнения.

2. Необходимо проведение дополнительных исследований по уточнению результатов пробных испытаний.

3. Поскольку частота следования импульсов в реальной установке небольшая, то целесообразно рассмотреть возможность использования в конденсаторах полярного пленочного диэлектрика.

Список литературы: 1. Ермилов И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 73-79. 2. Гребенников И.Ю., Гуноко В.И., Дмитришин А.Я. и др. Исследования зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режима эксплуатации // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 38-41. 3. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю. Сравнительный анализ показателей надежности высоковольтных конденсаторов // Вестник НТУ «ХПИ». – № 42. – 2005. – С. 104-109. 4. Кучинский Г.С., Шкуронат П.И., Шнейрсон Г.А. Генераторы больших импульсных токов // Сб. ст. – под ред. Велихова М. – «Физика и техника мощных импульсных систем». – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с. 5. Бутко С.М., Кравченко В.П., Рудаков В.В., Свиридов С.Н. Электрическая прочность конденсаторной изоляции с повышенным содержанием полипропиленовой пленки // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 16. – 2011. – С. 35-39. 6. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. – 224 с. 7. Рудаков В.В., Кравченко Ю. В. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХПІ». «Техніка і електрофізика високих напруг». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 20 – С. 167-174.

Поступила в редколлегию 07.10.2011